

**ОСОБЕННОСТИ ЛИФШИЦА  
В ТЕРМОЭДС У МОНОКРИСТАЛЛОВ  $n\text{-Bi}_{0,9}\text{Sb}_{0,1}$  ПРИ ПЕРЕХОДЕ  $2^{1/2}$  РОДА  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ АНИЗОТРОПНОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

*В.С.Егоров<sup>1)</sup>, М.Ю.Лавренюк, Н.Я.Минина, А.М.Савин*

На монокристаллических образцах  $n\text{-Bi}_{0,9}\text{Sb}_{0,1}$  проведены измерения термоэдс при гелиевых температурах под действием анизотропной деформации, при которой происходит перетекание всех электронов поверхности Ферми (ПФ) в один эллипсоид. Топологический переход к одноэллипсоидной ПФ контролировался по квантовым осцилляциям термоэдс. В области деформаций, соответствующих изменению топологии, наблюдается характерный пик в термоэдс.

<sup>1)</sup> Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова.

Одним из наиболее удобных способов исследования электронных переходов  $2^{1/2}$  рода, при которых должны наблюдаться предсказанные Лифшицем <sup>1</sup> аномалии в кинетических и термодинамических коэффициентах металлов, является анизотропная деформация. В этом случае, с одной стороны, возможен непрерывный переход через критическую точку, и, с другой стороны, достигается гораздо больший диапазон в изменении относительных размеров элементарной ячейки и, соответственно, ПФ по сравнению, например, со всесторонним сжатием. Чрезвычайно удачным по рекордным величинам анизотропных деформаций, получаемых на массивных монокристаллах, оказался метод деформирования образцов, имеющих форму диска, осуществляемый растяжением более жесткой по сравнению с образцом обложки, внутри которой и согласно с которой деформируется этот образец. Используя этот метод, удалось наблюдать несколько различных топологических изменений ПФ висмута и его сплавов с сурьмой <sup>2 1)</sup>. При этом однако, кроме наблюдения самого электронного перехода, контролировавшегося по осцилляциям сопротивления в магнитном поле (эффект Шубникова — де Гааза), не проводилось измерений возможных аномалий, предсказанных И.М.Лифшицем.

В настоящей работе предпринята попытка, применяя тот же способ получения деформаций, что и в <sup>2</sup>, и на такого же рода образцах одновременно с наблюдением топологического перехода провести измерения термоэдс. Как показали теоретические расчеты <sup>3</sup>, именно в термоэдс следует ожидать наиболее заметной аномалии, что уже подтвердилось при исследовании перехода  $2^{1/2}$  рода на сплавах литий — магний <sup>4</sup>.

Исследования проводились на монокристаллах  $n$ -Bi<sub>0,9</sub>Sb<sub>0,1</sub>. Заполнение трех эллипсоидов ПФ электронами осуществлялось за счет донорной примеси теллура, концентрация которого была  $\sim 10^{-4}$  ат.%. Монокристаллы растягивались в базисной плоскости кристалла вдоль оси  $C_2$ , так что изменение расположения термов  $L$ , схематично показанное на рис.1, приводило к перетеканию всех электронов ПФ в один эллипсоид. Образцы для измерений представляли собой диски  $\Phi$  3 мм и толщиной 0,8 мм, которые плотно вклеивались в обложку так, чтобы ось растяжения — ось  $Ox \parallel C_2$ ,  $Oy \parallel C_1$ ,  $Oz \parallel C_3$  (см. рис. 2). Растяжение обложки вдоль  $Ox$  приводило к деформации образца с нагрузкой  $F$ , которая определялась рентгенографически и составляла на 10Н нагрузки соответственно:  $\epsilon_{xx} = 4,3 \cdot 10^{-5}$ ,  $\epsilon_{yy} = -9,7 \cdot 10^{-5}$ ,  $\epsilon_{zz} = 3,3 \cdot 10^{-5}$ . Область однородной деформации расположена в центре диска и имеет размер  $\sim 1,5$  мм<sup>2</sup>. Деформация происходит обратимым образом, тем не менее после двадцатикратного приложения максимальной нагрузки качество образцов заметно ухудшалось. Отношение сопротивлений измеренных образцов  $R_{300}/R_{4,2} = 2$ . Контроль за размерами эллипсоидов ПФ в процессе деформации образца осуществлялся как измерением эффекта Шубникова — де Гааза (как и в <sup>2</sup>), так и квантовых осцилляций термоэдс, что оказалось значительно удобнее. Момент топологического перехода отмечался по прекращению возрастания сечения остающегося эллипсоида и фиксировался по энергии с точностью  $\sim 1$  мэВ. Из-за неоднородности в распределении теллура переходы в различных образцах происходили при несколько отличных значениях деформации.

Контакты для измерений изготовлялись либо прижимными из бериллиевой бронзы  $\Phi$  0,15 мм, либо приваривались медной проволокой  $\Phi$  0,05 мм. Их расположение определялось, во-первых, тем обстоятельством, что область однородной деформации находилась в центре диска, и, во-вторых, тем, что в процессе перетекания электронов в один эллипсоид проводимость и теплопроводность (последняя в значительно меньшей степени) становились анизотропными в плоскости диска. На рис. 2 изображено схематически расположение прижимных контактов при измерении термоэдс. В точке 1 создавался локальный нагрев образца при помощи заостренного медного стержня  $\Phi$  0,2 мм, на который был бифилярно намотан

<sup>1)</sup> Большую величину деформации удастся получить лишь при растяжении нитевидных кристаллов (вискоз), которые, однако, к сожалению не вырастают в подходящих рациональных направлениях.

нагреватель 8 Ом из манганиновой проволоки  $\Phi$  0,05 мм. "Горячий" потенциальный контакт 2 располагался на расстоянии  $\sim 0,2$  мм от 1, а контакты 3 и 4 – вблизи края диска. Измеряемая разность потенциалов  $U_{23(4)}$  определяется разностью термоэдс образца и контактной проволоки, однако основной вклад принадлежит образцу, термоэдс которого в этой области температур гораздо больше и  $\sim T \cdot 1$  мкВ/К<sup>2</sup>. При этом изменение  $U_{23}$  с нагрузкой  $F$  можно целиком приписать изменению термоэдс образца. Основной вклад в измеряемый сигнал давала центральная часть образца, где температурный градиент максимален. Для этого мощность, выделяемая в нагревателе, подбиралась достаточно малой, чтобы контакты 3 и 4 оставались холодными, т. е. имели температуру окружающего жидкого гелия. Наиболее резкий градиент температуры удалось создать в сверхтекучем гелии. Основная ошибка в измерениях может быть обусловлена лишь возможным изменением температуры "горячего" контакта 2 во время растяжения обоймы. Однако, большое число получаемых результатов в опытах, в которых варьировалась температура, мощность в нагревателе и расположение контактов, дают основание полагать, что это обстоятельство не могло существенным образом сказаться на характере обнаруженных аномалий.

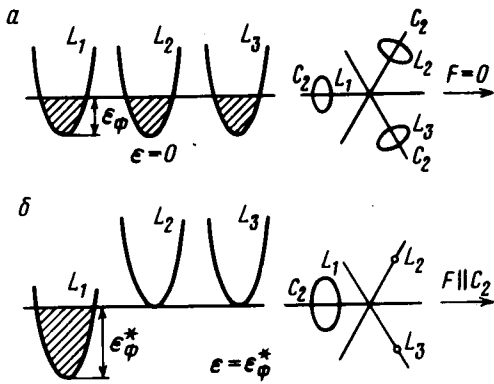


Рис. 1

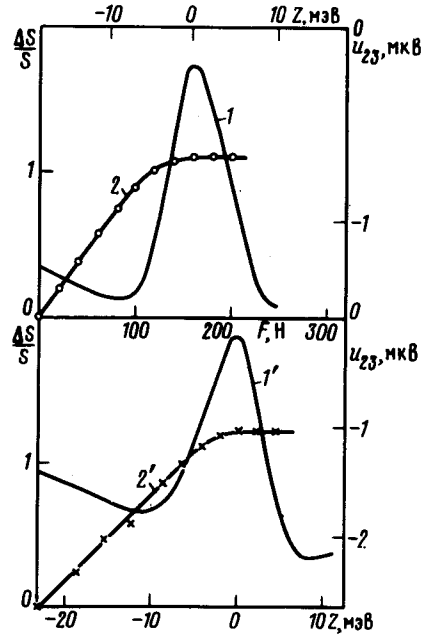


Рис. 3

Рис. 1. Схематическое изображение изменения расположения электронных экстремумов  $n$ - $\text{Bi}_{0,9}\text{Sb}_{0,1}$  при растяжении вдоль оси  $C_2$ : а – симметричное заполнение экстремумов при нулевой нагрузке, б – расположение экстремумов в момент топологического перехода, когда расстояние между расходящимися термами  $\epsilon = \epsilon^*_\Phi$ . Справа – заполнение соответствующих эллипсоидов ПФ

Рис. 2. Образец с контактами в растягивающейся обойме: 1 – точечный нагреватель, 2 – "горячий" потенциальный контакт, 3 и 4 – "холодные" потенциальные контакты

Рис. 3. Зависимости термоэдс  $U_{23}$  (кривые 1 и 1', шкала справа) и относительного изменения сечения растущего эллипсоида  $\Delta S/S$  (кривые 2 и 2', шкала слева) от величины нагрузки  $F$  для двух образцов. Сверху и снизу отложены значения параметра  $Z = \epsilon - \epsilon^*_\Phi$

На рис. 3 представлены две типичные записи на самописце термоэдс  $U_{23}$  в зависимости от приложенной нагрузки  $F$ , полученные при температуре  $T \approx 2\text{K}$  для двух образцов, несколько отличающихся по концентрации теллура. Здесь же приведены и зависимости отно-

сительного изменения экстремальных сечений растущего эллипсоида ПФ для соответствующих образцов. Сверху и снизу вдоль оси абсцисс отложены значения линейно меняющегося с нагрузкой параметра  $Z = \epsilon - \epsilon_{\Phi}^*$ , где  $\epsilon$  — энергетическое расстояние между неэквивалентными термами  $L_1$  и  $L_2(L_3)$ , увеличивающееся с нагрузкой, а  $\epsilon_{\Phi}^*$  — энергия Ферми электронов, слитых в один эллипсоид, которая оказалась равной 18 и 23 мэВ для кривых 2 и 2' соответственно. В точке перехода (рис. 1, б)  $Z = 0$ .

Из полученных результатов следует, что на фоне монотонного изменения термоэдс с нагрузкой в области  $Z = 0$  наблюдается положительный пик, ширина которого составляет  $\sim 5$  мэВ, т. е. несколько больше теплового размытия термов. Причиной уширения могут быть как отмеченная выше неоднородность в распределении теллура, так и возможная ошибка  $\lesssim 2^\circ$  в ориентации образца.

Следует также отметить, что фоновый вклад в термоэдс, особенно существенный у монокристаллов чистого висмута, является весьма чувствительным к деформациям решетки и к анизотропии проводимости. Поэтому при описываемой деформации образца его термоэдс, вообще говоря, может стать анизотропной, и, что особенно неприятно, эта анизотропия может изменяться в процессе деформирования. Тогда измеряемая нами величина явилась бы результатом весьма сложного усреднения термоэдс в различных направлениях. Однако, из температурных измерений термоэдс на близких по составу сплавах  $n$ - $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ <sup>5, 6</sup> можно заключить, что вклад увлечения фононов в термоэдс практически несуществен, и потому, как известно<sup>7</sup>, измеряемая нами диффузионная термоэдс остается изотропной, несмотря на анизотропию проводимости, и наблюдаемая особенность термоэдс целиком обусловлена особенностью в плотности состояний в точке  $Z = 0$ .

#### Литература

1. Лифшиц И.М. ЖЭТФ, 1960, 38, 1569.
2. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Минина Н.Я., Широких В.Д. ЖЭТФ, 1980, 78, 1114.
3. Вакс В.Г., Трефилов А.В., Фомичев С.В. ЖЭТФ, 1981, 80, 1613.
4. Егоров В.С., Федоров А.Н. ЖЭТФ, 1983, 85, 1647.
5. Редько Н.А., Польшин В.И., Косарев В.В., Иванов Г.А. ФТТ, 1983, 25, 3138.
6. Галев В.Н., Козлов В.А., Коломиец Н.В., Скипидаров С.Я. ФТП, 1982, 16, 917.
7. Satoilovich A.G., Nitzovich M.V., Nitzovich V.M. Phys. Stat. Sol., 1966, 16, 459.

Московский  
государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
25 мая 1984 г.